Analiza akustičkih karakteristika zvuka zvona

Iva M. Salom

Abstract — **Zvona su jedan od najstarijih muzičkih instrumenata. Pitanja kako zvono generiše zvuk i kako napraviti zvono koje dobro zvuči vrlo su stara. Danas nam je savremena tehnologija omogućila da detaljno ispitamo zvono kao specifičan izvor zvuka, ali je subjektivni doživljaj kao konačna mera kvaliteta izvora zvuka delimično zanemaren. Osnovni cilj ovog istraživanja bio je uspostavljanje veze između objektivnih i subjektivnih karakteristika zvuka zvona.**

Keywords — **kvalitet zvuka, subjektivni test, zvono**

I. UVOD

ZVONO je jedan od najstarijih muzičkih instrumenata. Zvona su predstavljala važan deo skoro svake kulture i različitih religija kroz istoriju čovečanstva[1]-[5]. Da li je karakterističan zvuk koji takav fizički oblik proizvodi razlog upotrebe zvona pri različitim ritualnim, magijskim, sakralnim i religijskim obredima od najdavnijih vremena, ili je iskonska navika čoveka da sluša zvuk zvona u vrlo specifičnim duhovnim prilikama, nesvesno prenošena generacijama, tek jasno je da zvuk zvona kod slušaoca izaziva posebna osećanja i karakterističan subjektivni doživljaj. Stoga je interesovanje za zvono kao izvor zvuka oduvek postojalo, a oblast koja se time bavi naziva se kampanologija (lat. *campana* – zvono, grč. *logos* – nauka). Kampanologija pokriva sve aspekte zvona kao izvora zvuka, od projektovanja oblika, livenja, štimovanja, do pobuđivanja pojedinih zvona kao i koršćenja zvona kao muzičkog instrumenta, kao što je karilon [6]. Odavno datiraju pokušaji da se da odgovor na pitanje kako definisati zvono koje prijatno zvuči, uzimajući u obzir fizičke mogućnosti samog zvona kao fizičkog tela zadatog oblika, kao i poredeći zvuk različitih zvona [7].

Prema istorijskim podacima, zvona se pominju još u staroj Kini oko 3000 godina pre nove ere, a upotrebljavali su ih Feničani, stari Egipćani, Grci, Rimljani. U hrišćanstvu zvona se prvi put pominju u spisima iz VI veka. Zvona kakva se danas vezuju za zapadnoevropske crkve, razvijena su u XVII veku, zahvaljujući braći Hemoni (*Francois* i *Pieter Hemony*), zvonolivcima iz Holandije, koji su zajedno sa muzičarem i karilonistom Jakobom van Ajkom (*Jackob van Eyck*) prvi definisali pravila za štimovanje zvona i odredili oblik zvona koji će obezbediti tražene karakteristike. Prema ovim pravilima se, posle skoro četiri veka, i dalje liju i štimuju zvona u savremenim zvonolivnicama u Zapadnoj Evropi [1], [3], [7]. Ovakvo štimovnje zvona posebno je važno kada se zvona koriste da proizvedu melodiju u muzičkom instrumentu – karilonu. Sa druge strane, postoji teorija po kojoj zvona u pravoslavnim crkvama imaju pre svega ulogu udaračkog instrumenta pa stoga melodijsko štimovanje zapravo nije ni poželjno [8].

S obzirom na nacionalni i religijski značaj koji su zvona imala na svim podnebljima, u cilju očuvanja kulturnog nasleđa u svetu su sprovođena istraživanja različitih zvona ([7], [9] - holandska, [10] – nemačka, [11] – austrijska, [12] - poljska, [13]-[16] - ruska, [17] - kineska, [18]– zapadno evropska, [19] – evropski projekat), a u nekim zemljama su formirane baze podataka zvona u crkvama sa njihovim karakteristikama ([20] – bugarska). Iako je Srpska pravoslavna crkva u svim svojim segmentima široko eksploatisana istraživačka tema, interesantno je da akustička analiza kvaliteta zvuka zvona koja se koriste u crkvama širom Srbije nije do sada predstavljala temu istraživanja. Tom temom bavili su se istraživači prevashodno u domenu istorijskih i drugih društvenih nauka, pa i to samo sporadično [5], [21], [22]. Otuda je potekla ideja da se sprovede obimno istraživanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika crkvenih zvona u Srbiji. Crkvenu arhitekturu ovog podneblja karakteriše složen i isprepletan uticaj zapadne i istočne tradicije. Stoga su graditelji crkava u zavisnosti od pomenutih uticaja koristili zvona koja se sreću kod istočnih pravoslavnih, odnosno zapadnih katoličkih graditelja pa je raznolikost zvona velika. U okviru ovog istraživanja analizom je obuhvaćeno preko 150 zvona, veoma različitih karakteristika i porekla.

Razlog zašto su zvona i njihov zvuk u prošlosti bili obavijeni velom tajni je taj što je bilo teško odrediti modove oscilovanja takve trodimenzionalne osno simetrične mase i eksplicitno ih povezati sa karakteristikama dobijenog zvuka. Danas je razvoj tehnologije omogućio da se zvona mogu detaljno analizirati, počevši od snimanja zvuka, analize zvuka primenom savremenih tehnika obrade signala i izdvajanja frekvencija modova oscilovanja zvona, ispitivanja relativnog odnosa amplituda i brzina opadanja komponenti, pa do numeričke analize primenom metoda konačnih elemenata (*Finite Element Analysis*) i računarskih simulacija. Kao posledica toga, u akustičkoj literaturi zvona kao specifičan izvor zvuka prilično su dobro obrađena tema u mnogim svojim bitnim segmentima. Posebno su dobro proučeni fizički principi mehaničkog oscilovanja tela zvona i veza između materijalizacije zvona i zračenja zvuka u okolni medij. Međutim, uz sve detljano ispitane objektivne karakteristike zvuka zvona delimično je zanemaren subjektivni doživljaj, kao konačna mera kvaliteta izvora zvuka. Stoga je primarni cilj ovog istraživanja bilo ispitivanje veze između objektivnih i subjektivnih karakteristika zvuka zvona, uzimajući u obzir detaljnu

Ovaj rad je napisan na osnovu aktivnosti realizovanih u okviru projekata TR23046 (2008-2011) i TR32038 (2011-2016) koje je finansiralo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

Iva M. Salom, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija; (telefon: 381-63-624-253; e-mail: iva.salom@pupin.rs).

978-1-5090-4086-5/16/$31.00 ©2016 IEEE

objektivnu analizu signala i razvojem nekih novih pristupa u analizi oscilovanja zvona. Pri tome, subjektivna analiza predstavlja posebnu temu sa perceptivnim, estetskim i kulturološkim aspektima.

Zvuk klasičnih muzičkih instrumenata nastaje radom jednodimenzionalnih oscilatora (žica, vazdušni stub). Zbog toga se on sastoji od diskretnih spektralnih komponenata čije su frekvencije u harmonijskom odnosu [3], [7], [23], [24]. Subjektivan doživljaj takvog zvuka je ton čija je visina pre svega određena frekvencijom osnovnog harmonika. Jedinstvena zvučna slika koju stvaraju harmonijske komponente, njihov sastav, odnosi amplituda i talasni oblici obvojnica, određuje boju ili kvalitet tona muzičkog instrumenta [23]. Za razliku od klasičnih muzičkih instrumenata, zvuk zvona nastaje oscilovanjem trodimenzionalne osnosimetrične mase. Udarom bata pobuđuju se sopstveni modovi oscilovanja takve mase, pa je spektar zvuka takođe diskretan. Komponente u spektru zvuka zvona, takozvani parcijali, odgovaraju frekvencijama sopstvenih modova zvona, i one nisu u harmonijskom odnosu [1]-[3], [25]. Iako bi se očekivalo da ovako složena struktura parcijala u ljudskom čulu sluha stvara složenu zvučnu sliku u kojoj se prepoznaje više različitih tonova, ipak se subjektivno najčešće izdvaja jedan ton koji se naziva udarni ton, i on u muzičkom smislu predstvalja jednu od osnovnih karakteristika zvuka zvona. Subjektivni doživljaj zvuka zvona predstavlja složenu psihoakustičku temu, jer subjektivni doživljaj visine tona zvona u muzičkom smislu nije uvek direktno korelisan s njegovim spektralnim sadržajem, a tranzijentna priroda tog zvuka predstavlja uzrok složenosti doživljaja boje zvuka. Udarni ton, zajedno sa još jednim tonom (koji se nekad može prepoznati i naziva se sekundarni udarni ton [1]-[3], [26] i višim parcijalima, stapa se u jedinstvenu zvučnu sliku koja čini karakterističan i prepoznatljiv zvuk zvona. Prema istorijski gledano najstarijem pravilu, koje su ustanovili van Ajk i braća Hemoni, prvih pet parcijala dominantno utiču na subjektivni doživljaj zvuka zvona i određuju udarni ton. Kod zvona koje dobro zvuči, kasnije nazvanog idealno zvono, odnos frekvencija prvih pet parcijala treba da bude 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4 [1]-[3], [25]. Zvona u zapadnoevropskim katoličkim crkvama (*Western minor-third church bell*) imaju odnos frekvencija prvih pet parcijala koji odgovara idealnom zvonu. Ovakav odnos parcijala obezbeđuje udarni ton koji se jasno i čisto čuje.

Istraživanje zvona spada u multidisciplanrna istraživanja i obuhvata široku lepezu različitih oblasti: od fizike, koja objašnjava način oscilovanja tela takvog oblika, akustike, koja objašnjava generisanje i zračenje zvuka, audiotehnike, koja omogućava snimanje zvuka zvona, obrade signala, koja omogućava analizu signala i izdvajanje objektivnih parametara, pa do psihoakustike, koja objašnjava subjektivni doživljaj tog karakterističnog zvuka. Naravno, ne sme se zaboraviti ni istorijska komponenta razvoja zvona, kao najstarijeg muzičkog instrumenta koji je obeležio gotovo svaku kulturu.

Osnovni doprinos ovog istraživanja predstavlja uspostavljanje veze između objektivnih i subjektivnih karakteristika zvuka zvona. Razvijena je posebna metodologija subjektivnog testiranja i sproveden je veliki broj eksperimenata. Ispitivana je subjektivna ocena kvaliteta zvuka zvona, a nezavisno su sprovedeni subjektivni testovi za određivanje udarnog tona zvona. Analizirane su objektivne karakterstike zvuka zvona primenom različitih tehnika digitalne obrade signala, uvedeno je nekoliko parametara za objektivnu ocenu zvuka zvona i uspostavljena je njihova korelacija sa subjektivnom ocenom. Udarni ton zvona određen je algoritmom izvedenim iz teorije o percepciji visine tona na osnovu virtuelnih tonova. Algoritam je prilagođen analizi karakterističnog izvora zvuka kao što je zvono i pokazano je da u velikom broju slučajeva daje zadovoljavajuće rezultate. Dodatno, vršeno je fizičko modelovanje zvona i ispitivanje oscilovanja i zračenja zvona primenom metode konačnih elemenata.

II. ZVONO KAO IZVOR ZVUKA

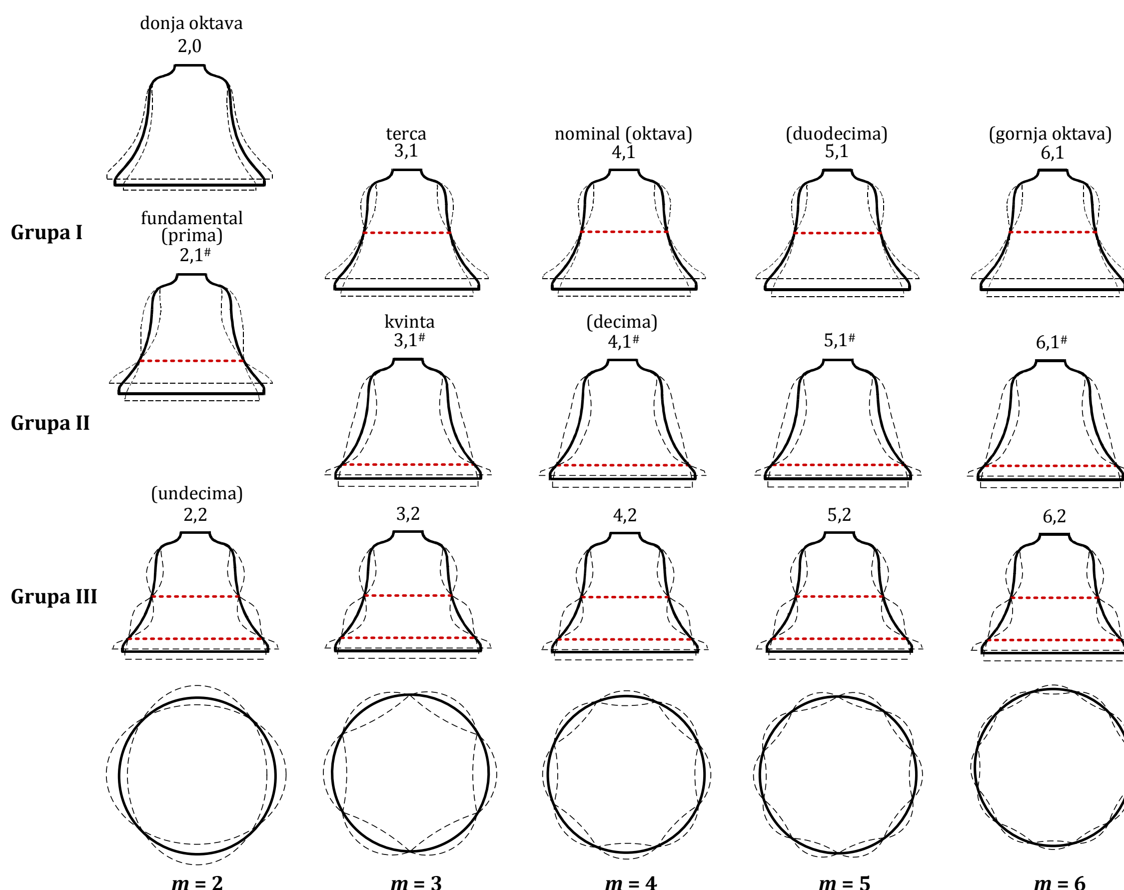
Zvona kakva se danas sreću u hrišćanskim crkvama, i pored izvesnih odstupanja u geometriji, generalno imaju prepoznatljiv oblik. Osnovne paramtre zvona predstavljaju oblik (profil) zvona, veličina zvona, koju određuju visina zvona H i poluprečnik otvora zvona na obodu, R_0, i materijal od kog je izliveno zvono. Jedan od bitnijih parametara profila zvona je relativna debljina (debljina u odnosu na veličine H i R_0) i njena promena duž profila zvona [27]. Svi ovi paramteri određuju sopstvene modove oscilovanja zvona (en. *normal modes of vibration*), uključujući sopstvene frekvencije i odnose frekvencija različitih modova, kao i brzine opadanja amplituda. Sa druge strane, apsolutne vrednosti i relativni odnosi amplituda zavise od položaja, jačine i tipa pobude (na primer, oblik i materijal bata).

Iako karakterističnog oblika, u opštem slučaju zvono se može definisati kao šuplje osnosimetrično telo. Kada se pobudi (na primer udarom bata) zvono počinje da osciluje na vrlo složen način. S obzirom da su pomeraji prilikom udara vrlo mali, nelinearni efekti se mogu zanemariti [28]. Posmatrajući zvono kao linearan elastičan sistem, oscilatorno kretanje zvona može se predstaviti kao linearna kombinacija pobuđenih sopstvenih modova oscilovanja zvona, čije su početne amplitude određene parametrima pobude [2]-[4], [25]. Osnovna karakteristika svakog od sopstvenih modova je njegova sopstvena frekvencija oscilovanja (en. *eigen frequency*), koja odgovara jednoj komponenti u zvuku zvona – parcijalu.

Svaki od modova oscilovanja zvona karakterišu linije na zvonu (čvorovi) duž kojih nema kretanja. U opsežnoj literaturi teorijski i praktično je pokazano da svaki mod oscilovanja zvona karakteriše $2m$ čvorova (meridijana) u horizontalnoj ravni, normalnoj na osu zvona, i n čvorova u verikalnoj ravni, tj. prstenova paralelnih sa obodom zvona, gde su m, n = 0, 1, 2...[1]-[4], [25]. U slučaju idealnog osnosimetričnog zvona $2m$ čvorova u horizontalnoj ravni ravnomerno su raspoređeni duž poprečnog preseka.

Analizom oblika zvona primenom teorije grupa može se pokazati da se modovi oscilovanja zvona mogu klasifikovati prema ireducibilnim reprezentacijama grupe rotacija zvona oko svoje ose [28]. Ova klasifikacija se vrši na osnovu broja čvorova u vertikalnoj ravni, a oscilovanje modova u horizontalnoj ravni izvedeno je primenom operacija simterije. Kao i kod drugih tela sličnog oblika, i kod zvona se razlikuju fleksione (en. *flexural, inextensional*) i ekstenzione (en. *extensional*) oscilacije [2]-[4], [25], [29]. Fleksione oscilacije podrazumevaju da dolazi samo do savijanja materijala i samim tim obim posmatran u bilo kojoj horizontalnoj ravni normalnoj na osu simetrije zvona, ostaje nepromenjen [4], [29], [30]. Kod ekstenzionih oscilacija dolazi do istezanja materijala, ali tako da je brzina tangencijalnog kretanja tačaka na prstenu proporcionalna brzini iskretanja delića površine.

Primenom teorije grupa, kao i eksperimentalnim



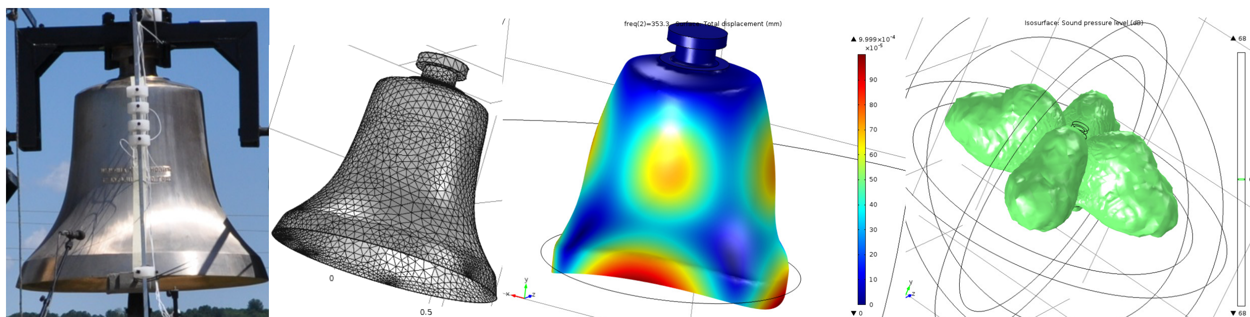
Sl. 1 Fleksioni modovi oscilovanja zvona

ispitivanjima, pokazano je da su kod idealno simetričnog zvona modovi za koje je $m > 0$ degenerisani, konkretno udvojeni (en. *doublet*), što znači da postoje dva moda oscilovanja sa istom sopstvenom frekvencijom, kod kojih se čvorovi oscilovanja u vertikalnoj ravni jednog moda poklapaju sa trbusima oscilovanja drugog moda [2]-[4], [28], [31]. Kada je simetrija na bilo koji način narušena (odstupanja u geomtriji zvona, nehomogenost materijala od kog je izliveno zvono, dodatni ukrasi na zvonu), dolazi do razdvajanja sopstvenih frekvencija ovih modova. Ove razdvojene frekvencije su najčešće vrlo bliske tako da nastaje pojava „izbijanja“, koja dovodi do karakterističnog treperenja, brujanja u subjektivnom doživljaju zvuka zvona. Modovi bez čvorova u horizontalnoj ravni ($m = 0$) su jedini modovi koji nisu degenerisani (en. *singlet*).

Akustički značajni parcijali su upravo oni koji potiču od sopstvenih modova kod kojih je oscilatorno kretanje dominantno normalno na površinu zvona, odnosno imaju značajnu radijalnu komponentu. Kod fleksionih modova kod kojih je $m = 0$ kretanje je isključivo tangencijalno, dok sa porastom m radijalna (normalna) komponenta postaje sve više izražena. Kod ekstenzionih modova je obrnuto: za ekstenzione modove za koje je $m = 0$ kretanje je isključivo radijalno i ovi modovi bi mogli značajno doprinositi zvuku zvona, međutim energija koja je potrebna za rastezanje zvona dovodi do toga da su ovi modovi su relativno slabo pobuđeni, pri čemu su sopstvene frekvencije veoma visoke (s obzirom da je frekvencija direktno srazmerna krutosti, koja je u ovom slučaju velika) [7], [25]. Generalno, ekstenzioni modovi gotovo da ne doprinose zvuku zvona, dok su modovi koji najviše doprinose zvuku zvona fleksioni modovi za koje je $m \geq 2$. U literaturi je uobičajeno da se ovi modovi podele u gupe sa određenim zajedničkim karakteristikama [4], [27]. Za razliku od klasifikacije na osnovu broja čvorova u horizontalnoj ravni primenom teorije grupa [28], primećno je da se u okviru grupe modova koji osciluju na isti način u vertikalnoj ravni, odnosno imaju u vertikalnoj ravni čvorove na istim mestima, karakteristike modova menjaju na vrlo sličan način sa promenom oblika zvona, i da postoji izvesna zavisnost između frekvencija modova u okviru iste grupe [7], [18]. Usvojena su dva načina obeležavanja. Prema prvom načinu (na primer, II-3), modovi koji imaju čvorove na istim mestima u vertikalnoj ravni obeležavaju se rimskim brojevima I, II, itd. dok drugi broj označava polovinu broja čvorova posmatrano u horizontalnoj ravni [7], [27]. Na drugi način modovi zvona se mogu obeležavati kao (m, n) gde m predstavlja polovinu broja čvorova u horizontalnoj ravni, a n predstavlja broj čvorova u vertikalnoj ravni [1]-[4].

Na slici 1 prikazano je 15 fleksionih modova oscilovanja zvona grupisanih po položajima čvorova u vertikalnoj i u horizontalnoj ravni. Može se uočiti da modovi koji pripadaju grupi I imaju jedan čvor u vertikalnoj ravni i to na sredini tela zvona (oko pojasa). Oscilovanje ovih modova u delu oko oboda zvona ima slične karakteristike kao nezavisno oscilovanje debelog prstena na obodu oko unutrašnjeg luka (en. *ring driven modes*) [4], [28], [31] i često se obeležavaju i kao RIR (en. *Rim Inextensional Ring*) modovi [28], [31]. Ovi modovi najčešće najviše doprinose zvuku zvona s obzirom da su direktno pobuđeni udarom bata.

Modovi koji pripadaju grupi II imaju jedan čvor u vertikalnoj ravni pri obodu zvona i karakteriše ih oscilovanje tela zvona (en. *shell driven modes*). Svi modovi viših grupa (III, IV, itd.) imaju čvor u blizini oboda zvona, stoga imaju slične karakteristike oscilovanja i spadaju u shell driven modove. Ovi modovi su značajno slabije izraženi u zvuku

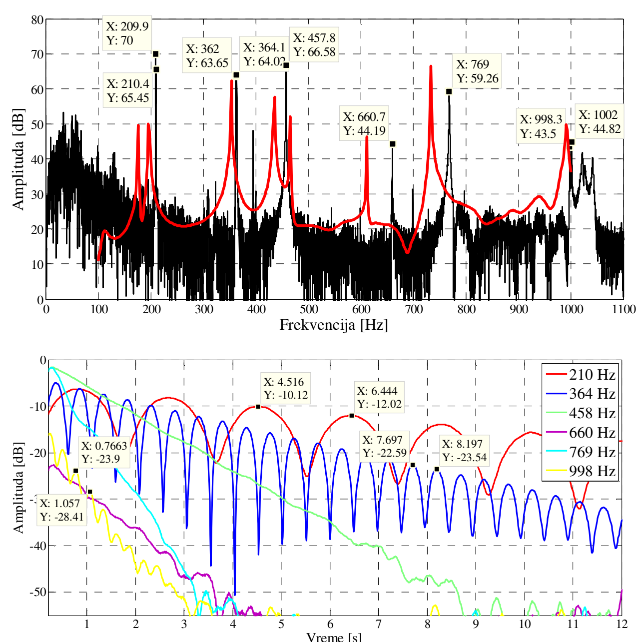


Sl. 2. Analizirano zvono od 600 kg: izgled zvona, model, drugi sopstveni mod: oblik moda oscilovanja, usmerenost

zvona od modova grupe I, naročito zbog toga što se mesto udara bata najčešće nalazi na obodu u blizini najnižeg čvora u vertikalnoj ravni. Dva moda koja bi se po utvrđenom kriterijumu oscilovanja u vertikalnoj ravni mogla svrstati u posebne grupe su modovi (2,0) i (2,1#). S obzirom da kod crkvenih zvona grupe I i II nemaju odgovarajuće modove sa $m = 2$ određeni autori mod (2,0) obeležavaju kao I-2, dok mod (2,1#) obeležavaju kao II-2, odnosno svrstavaju ih u grupu I i II, respektivno [7], [27]. Mod (2,0) je jedini mod koji nema čvorove u vertikalnoj ravni, ali se ponaša kao *ring driven* mod i značajno doprinosi zvuku zvona. Mod (2,1#) po položaju čvora u vertikalnoj ravni više pripada grupi II, ali po načinu zračenja ponaša se ujedno kao mod (2,1) i kao mod (2,1#), takođe značajno doprinoseći zvuku zvona [4], [7].

Kako je dugo smatrano da prvih pet parcijala dominanto utiču na subjektivni doživljaj zvuka, a time i na kvalitet zvona, u kolokvijalnoj literaturi se javljaju nazivi prvih parcijala prema muzičkom intervalnom odnosu kod idealnog zvona [2], [3], [18]. Prvi parcijal naziva se donja oktava (nem. *Unteroktave*, en. *hum*, fr. *bourdon*), a zatim slede fundamental (prima), terca, kvinta i nominal.

III. Objektivne karakteristike zvuka zvona



Sl. 3. Analizirano zvono od 600 kg:
a) spektar i izdvojenih prvih 6 parcijala;
b) opadanje amplituda odgovarajućih parcijala

Danas nam je savremena tehnologija omogućila da dublje istražujemo zvono kao specifičan izvor zvuka i njegov uticaj na slušaoca kroz savremene tehnike snimanja zvuka i digitalne obrade signala, fizičkog modelovanja i računarskih simulacija primenom metoda konačnih elemenata. Sve ovo nam pruža mogućnosti da ispitujemo koji su to parametri koji utiču na zvuk zvona i na koji način, sa krajnjim ciljem da se ostvari što kavlitetniji subjektivni doživljaj.

Potpuno razumevanje oscilovanja zvona i ispitivanje uticaja pojedinih fizičkih parametara na ovo oscilovanje omogućeno je primenom numeričkih metoda i razvojem računarskih simulacija. Sredinom XX veka razvijena je numerička metoda za približno rešavanje graničnih problema sa zadatim početnim uslovima nazvana metoda konačnih elemenata (*Finite Element Analysis* - FEM) [32]. Primenom FEM analize mogu se dobro proučiti i prikazati fizički principi mehaničkog oscilovanja tela zvona i veza između materijalizacije zvona i zračenja zvuka u okolni medij, kao i ispitati uticaji različitih parametara kao što su vrsta materijala, promena profila i slično, na akustičke karakteritike izlivenog zvona. Na slici 2 prikazan je proces i rezultati modelovanja jednog zvona od 600 kg izlivenog u livnici Ligrap porodice Kremenović [33].

Snimanje zvona danas se vrši kvalitetnim mernim mikrofonima. Digitalni audio zapis se analizira primenom standardne metode koja se najčešće koristi za analizu promenljivih signala: vremenski zavisna Furijeova transformacija (*Short Time Fourier Transform* - STFT). Na taj način se odgovarajućim podešavanjem parametara analize mogu precizno izdvojiti frekvencije modova oscilovanja zvona iz snimljenog signala, kao i brzina opadanja pojedinih komponenti i relativni odnos amplituda. Na slici 3 prikazan je spektar zvona od 600 kg (čije su simulacije prikazane na slici 2), koje je snimljeno na rastojanju od 2 m. Na slici je označeno prvih šest parcijala, pri čemu su izdvojene obe komponente udvojenih parcijala (koji se kod ovog zvona javljaju kod prvog, drugog i šestog parcijala). Na slici 3b prikazan je dijagram opadanja prvih šest pacijala dobijen primenom STFT. Na slici su označeni karakteristični maksimumi koji potvrđuju da kod prvog, drugog i šestog parcijla postoje udvojeni parcijali, koji približno odgovaraju razlici frekvecnija udvojenih parcijala na slici 3a. Sa dijagrama sa slike 3b jednostavno se izračunavaju brzine opadanja pojedinih parcijala kao odnos razlika amplituda i vremenskih koordinata dve označene tačke na krivoj vremenske promene amplitude. Za udvojne parcijale uočava se pojava izbijanja, a posmatra se brzina opadanja maksimalne vrednosti obvojnice, odnosno odabiraju se dve tačke na lokalnim maksimumima obvojnice, kao što je to prikazano na slici 3b. Na slici 3a crvenom bojom prikazan je rezultat simulacije na 2 m od centra zvona u pravcu udara u ravni oboda zvona u

frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 1000 Hz. Uočava se blago odstupanje rezultata simulacije ka nižim frekvencijama na svim modovima, koji mogu biti posledica odstupanja idealnog modela od realnog zvona. Pojava zračenja na frekvencijama ekstenzionih modova u simulaciji ne odgovara teorijskim razmatranjima i rezultatima realnog merenja.

IV. Jednobrojni objektivni parametri

Imajući u vidu način oscilovanja zvona i objektivne karakteristike signala zvuka zvona prikazane u prethodnom poglavlju, nametnulo se pitanje da li je moguće na osnovu precizno određenih objektivnih parametara uvesti jednobrojnu ocenu kao meru kvaliteta zvona, koji bi bio korelisan sa subjektivnim estetskim doživljajem zvuka zvona. S obzirom da se smatra da prvih pet parcijala dominantno utiču na subjektivni doživljaj zvuka zvona definisana su dva objektivna parametra [34]-[36].

A. *Odstupanje od najbližeg idealnog zvona*

Kao što je već pomenuto, zvono je idealno ako je odnos frekvencija prvih pet parcijala 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4. Stav da prvih pet parcijala dominantno utiču na subjektini doživljaj zvuka zvona ne znači da vrednosti frekvencija ostalih parcijala mogu biti proizvoljne. Štaviše, podešavanje odnosa frekvencija prvih pet parcijala prema idealnom, imajući na umu razmatranja iz poglavlja II, znači da će i odnosi frekvencija viših parcijala biti odgovarajući za zvono zadatog oblika.

Ako neko zvono treba oceniti na osnovu toga koliko frekvencije njegovih prvih pet parcijala odstupaju od idealnog odnosa, slede dva pitanja: 1) kako odrediti referentno idealno zvono, i 2) kako definisati odstupanje. Uzimajući u obzir logaritamsku prirodu ljudskog sluha u odnosu na frekvenciju, kao i definiciju centa, rastojanje između dva parcijala najbolje je izraziti u centima. Za svako zvono definisano je najbliže idealno zvono kao idealno zvono čiji je zbir apsolutnih rastojanja prvih pet parcijala od prvih pet parcijala analiziranog zvona najmanje [34]-[36]. Drugim rečima, ako su frekvencije prvih pet parcijala posmatranog zvona f_1, f_2, f_3, f_4 i f_5, a frekvencije prvih pet parcijala idealnog zvona $f_{\mathrm{id}1}$, $f_{\mathrm{id}2}$, $f_{\mathrm{id}3}$, $f_{\mathrm{id}4}$ i $f_{\mathrm{id}5}$ (gde važi da je $f_{\mathrm{id}1} : f_{\mathrm{id}2} : f_{\mathrm{id}3}\, f_{\mathrm{id}4} : f_{\mathrm{id}5} = 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4$), onda za najbliže idealno zvono suma

$$c = 1200 \sum_{i=1}^{5} \left| \log_2 \frac{f_{\mathrm{id}i}}{f_i} \right| \quad [¢] \tag{1}$$

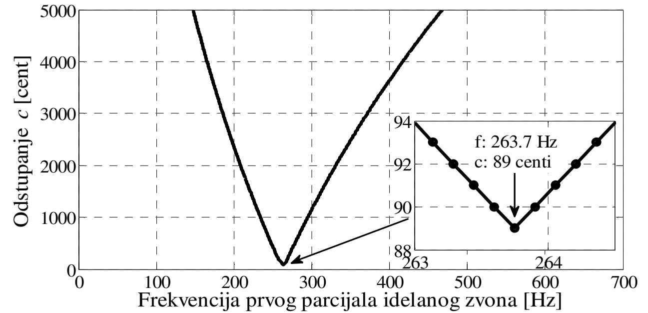
ima minimalnu vrednost. Ova minimalna vrednost, parametar odstupanja $c_{\min}$, uveden je kao mera kvaliteta zvuka zvona. Zvona se mogu upoređivati prema ovom parametru, a njegova vrednost bi trebalo da bude obrnuto srazmerna kvalitetu zvuka zvona.

Radi jednostavnijeg poređenja zvona uvedena je normalizacija vrednosti $c_{\min}$ svodeći je na interval od 0 do 1. Polazeći od definicije centa kao logaritamske jedinice mere muzičkih intervala, najmanji parametar odstupanja $c_{\min}$ je transformisan izrazom:

$$\bar{c}_{\min} = 2^{-\frac{c_{\min}}{1200}} \tag{2}$$

pa vrednost 1 označava da odnosi frekvencija prvih pet parcijala odgovaraju idealnom, dok vrednost koja teži 0 označava velika odstupanja od idealnog zvona.

Karakteristična promena parametra odstupanja c u zavisnosti od frekvencije prvog parcijala idealnog zvona prikazana je na slici 4, na kojoj se uočava jasno izražen minimum. Za prikazano zvono frekvencija prvog parcijala najbližeg idealnog zvona je $f_{\mathrm{id}1}$ = 264 Hz, a vrednost najmanjeg parametra odstupanja iznosi $c_{\min}$ = 89 centi. Za veliki broj analiziranih zvona pokazano je da posmatrano zvono i njemu najbliže idealno zvono uvek imaju jednake frekvencije bar jednog od prvih pet parcijala.



Sl. 4. Parametar odstupanja c

B. *Energija sadržana u prvih pet parcijala*

Polazeći od činjenice da energija može različito biti raspoređena u spektru zvona, kao i da prvih pet parcijala dominantno utiču na subjektivni doživljaj zvuka zvona, uveden je parametar koji odgovara relativnoj energiji sadržanoj u prvih pet parcijala:

$$e_{ri} = 100 \frac{E_i}{\sum_{k=1}^{3} E_k} [\%]. \tag{3}$$

V. Subjektivni doživljaj zvuka zvona

Za razumevanje subjektivnog doživljaja zvuka zvona, kao i percepcije različitih osobenosti tog zvuka, kao što su pojava izbijanja i udarni ton, potrebno je osvrnuti se na rad i karakteristike čula sluha. Čulo sluha čoveka predstavlja vrlo složen mehanizam koji ni danas nije izučen do kraja. Zvučna slika koju čovek percipira posledica je isprepletanih uticaja različitih fizioloških i psiholoških procesa. Sama anatomska građa uha, koja spada u fiziologiju čula sluha, prilično je dobro proučena i zahvaljujući tome mogu se objasniti pojedini pojmovi i fenomeni čula sluha, kao što su kritični opsezi, najmanja primetna promena frekvencije, efekat maskiranja, oktavna neodređenost, koji svi zajedno doprinose razumevanju složenih mehanizama koji dovode do detekcije subjektivnih atributa zvuka, kao što je visina tona.

A. *Udarni ton*

Jedna od osnovnih karakteristika zvuka zvona u muzičkom smislu je udarni ton (en. *strike note (strike tone)*, nem. *Schlagton*), koji predstavlja subjektivno doživljenu visinu tona zvona. Zavisnost udarnog tona od karakteristika parcijala generalno je vrlo složena. Jedno od najstarijih pravila je da se udarni ton nalazi za oktavu niže od petog parcijala pa se prema tome kod idealnog zvona udarni ton poklapa sa drugim parcijalom [1]-[3]. U velikom broju istraživanja, prikazanim u literaturi, uspostavljane su različite korelacije između frekvencija parcijala i udarnog tona (nedostajući fundamental nekoliko viših parcijala, ton razlike petog i sedmog parcijala, uticaj frekvencije sedmog parcijala), ali ni jedna se nije pokazala kao potpuno ispravna [37]-[44].

Visina tona je generalno jedan od najznačajnijih subjektivnih atributa zvuka i zato principi subjektivne percepcije visine tona naročito složenih zvukova ne prestaju

da budu predmet interesovanja i istraživanja. Danas postoji nekoliko osnovnih teorija o načinu na koji ljudsko uho analizira zvuk koji dolazi do njega i subjektivnim testiranjima su delimično potvrđene različite ideje. Jedna njih je teorija virtuelnih tonova (en. *virtual pitch theory*) čiji je začetnik *E. Terhardt* [45]-[48]. *Terhardt* je uveo pojmove spektralnog i virtuelnog tona. Spektralni tonovi odgovaraju realno postojećim komponentama zvuka i posledica su analitičkog slušanja, dok se virtuelni tonovi ne poklapaju ni sa jednom od komponenti zvuka i posledica su holističkog slušanja. U [10] i [18] realizovan je algoritam sa tadašnjim tehničkim mogućnostima i pokazano je da se u velikom broju slučajeva rezultati poklapaju sa udarnim tonom dobijenim u subjektivnim testovima. U ovom istraživanju pokazano je da unapređena realizacija algoritma sa zadovoljavajućom tačnošću daje informaciju o potencijalnim položajima udarnog tona analiziranog zvona i da se može koristiti za procenu udarnog tona zvona bez sprovođenja subjektivnih testova, kao vrsta verifikacije zvona.

B. Boja zvuka zvona

Zvona istog udarnog tona mogu se razlikovati po boji. Generalno se za zvuk zvona koriste izrazi „svetlo“, „oštro“, „tupo“, „prodorno“, „harmonično“, koji ih vezuju za boju, odnosno kvalitet zvuka zvona [18]. Boja zvona zavisi od spektra zvuka zvona i njegove promene u vremenu [11], [18]. Različiti parametri mogu uticati na boju zvuka zvona, direktno ili posredno. Jedan od parametara koji direktno utiče na boju zvuka zvona je materijal od kog je izliveno zvono i njegove karakteristike, kao što je slabljenje. Parametri koji posredno utiču na boju zvuka zvona su način pobude, tj. bat kojim se pobuđuje zvono i akustičko okruženje, tj. zvonik [11], kao i položaj slušaoca (mikrofona) u odnosu na zvono.

C. Kulturološki uticaj

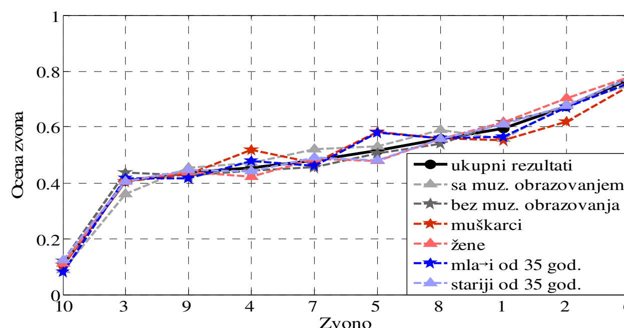
Tokom istorije na različitim podnebljima nezavisno se razvijalo zvono i njegov oblik, a time i zvuk koji proizvodi. U zapadnoevropskim katoličkim crkvama danas se uglavnom nalaze idealna zvona (odnos frekvencija prvih pet parcijala je 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4). Zvona u muzičkom instrumentu karilonu su nešto drugačijeg oblika, ali sa istim odnosom prvih pet parcijala. Sa druge strane, iako su načelno sličnog oblika zvona u pravoslavnim crkvama imaju pre svega ulogu udaračkog instrumenta pa stoga melodijsko štimovanje zapravo nije ni poželjno [8]. Azijska zvona su potpuno drugačijeg oblika, koji nije osnosimetričan, a njihov zvuk se sastoji od dve istaknute komponente čiji je odnos mala terca [2], [3]. Sa druge strane, uočene su određene razlike između ljudi različitih nacija. Na primer, postoje značajne razlike u načinu na koji mozak ljudi iz Japana i mozak ljudi iz zapadne Evrope obrađuje zvuk [49]. Kulturološke i fiziološke razlike generalno su značajno uticale na razvoj muzike na različitim podnebljima i u različitim epohama. Stoga je sama percepcija muzike vezana za određene ne samo muzičke oblike, već i zvučne efekte, kojima su ljudi neprekidno izloženi. Imajući u vidu navedene kulturološke i fiziološke razlike može se očekivati da se subjektivni doživljaj zvona razlikuje među ljudima sa različitih podneblja.

VI. SUBJEKTIVNA OCENA ZVUKA ZVONA

Subjektivna ocena zvuka zvona može biti kvalitativna, sa ciljem poređenja kvaliteta zvuka različizih zvona, i kvantitativna, u smislu određivanja udarnog tona.

A. Kvalitativni subjektivni testovi

Kao što je već pomenuto, pitanje kako definisati zvono koje dobro zvuči veoma je staro. Posebno pitanje, koje, koliko je autoru poznato, do sada nije bilo postavljano, jeste da li uopšte postoji univerzalni estetski doživljaj zvuka zvona. Odgovor na ovo pitanje moguće je dati sprovođenjem subjektivnog testiranja. U tom cilju sprovedeni su subjektivni testovi primenom poznate psihometrijekse metode poređenja po parovima. Metoda se zasniva na formiranju svih parova objekata iz analiziranog skupa, a testirani subjekat poredi svaka dva objekta i određuje koji objekat više zadovoljava zadati kriterijum. Primenom različitih metoda obrade rezultata testa (kao što su metoda srednjih ocena [50], *Thurstone*-ov zakon komparativnog suda (*Law of Comparative Judgment*) [51], *Bradley-Terry-Luce* (BTL) model [52]) dolazi se do ordinalne skale u kojoj su objekti sortirani po određenom kriterijumu. Na slici 5 prikazani su rezultati subjektivnih testova sprovedeni sa 130 subjekata različitiog muzičkog obrazovanja, pola i starosti, nad grupom od 10 različitih zvona. Sa slike se može zaključiti da postoji opšti subjektivni stav o kvalitetu zvuka zvona, bez obzira na muzičko obrazovanje, pol i starost. Analizirana zvona se gotovo jednoznačno mogu subjektivno oceniti i iz dobijene kvalitativne skale ocena jasno se mogu izdvojiti zvona koja zvuče dobro i zvona koja zvuče loše.

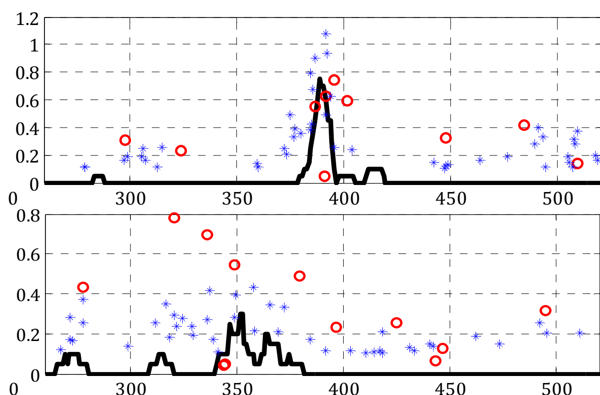


Sl. 5. Poređenje ocena zvona različitih grupa subjekata

B. Kvantitativni subjektivni testovi

Kvantitativni subjektivni testovi sprovedeni su u cilju određivanja udarnog tona zvona. Testovi su obuhvatili različite vrste reprodukcije snimljenog zvuka (slušalice, zvučnik), kao i različite vrste procene udarnog tona (poređenjem sa sinusnim tonom, vokalnom reprodukcijom). Rezultati sprovedenih testova pokazali su da udarni ton generalno nije jasno definisan i da zavisi od testiranog subjekta, od okolinosti pod kojima se test sprovodi, kao i od spektralnih karakteristika zvona. Ipak, rezultati, prikazani u formi statističke raspodele procenjene subjektivne visine tona zvona (histograma), pokazali su da se može uočiti maksimum histograma koji je manje ili više izražen i frekvencija koja odgovara ovom maksimumu može se smatrati udarnim tonom zvona. Na slici 6 crna kriva predstvalja histogram raspodele frekvencija udarnog tona za odabranih 5 subjekata normalizovan na jednu oktavu (zbog efekta oktavne neodređenosti) na primeru jednog zvona za koje je jasno izražen udarni ton (6a) i na primeru zvona za koje nije jasno izražen udarni ton (6b). S obzirom na ovakvu nepreciznost jedinog mogućeg načina određivanja visine tona složenog zvuka, konkretno zvuka zvona, neosnovano je očekivati da se realizuje algoritam koji može preciznije oceniti udarni ton. Na slici 6 prikazani su i rezultati algoritma virtuelnih tonova, pomenutog u poglavlju V.A.

Realizovani algoritam virtuelnih tonova sa zadovoljavajućom tačnošću daje informaciju o potencijalnim položajima udarnog tona analiziranog zvona i može se koristiti za procenu udarnog tona zvona bez sprovođenja subjektivnih testova, kao vrsta verifikacije novih zvona, naročito ako treba vršiti uparivanje više zvona.



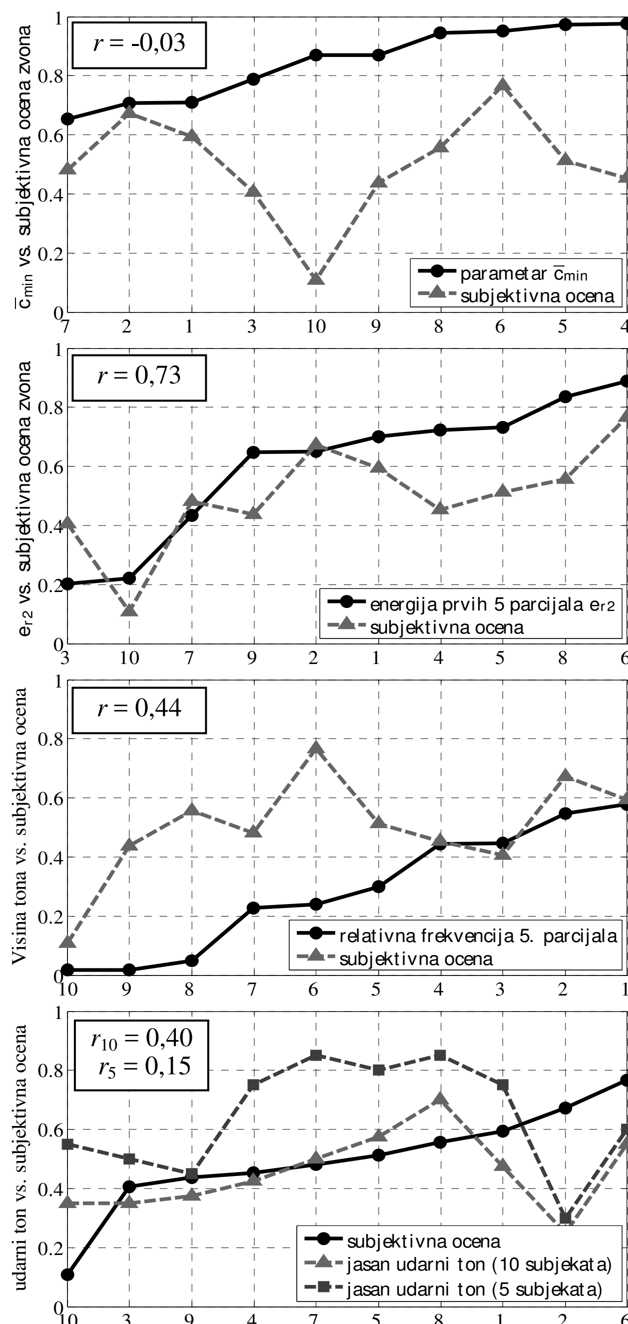
Sl. 6. Histogrami vrednosti udarnog tona dva zvona dobijeni u subjektivnom testu (—), kao i spektralni (o) i virtuelni tonovi (∗) dobijeni algoritom virtuelnih tonova

VII. Poređenje subjektivnih i objektivnih ocena

Na slici 7 prikazana su poređenja objektivnih ocena sa rezultatima subjektivnih kvalitativnih testova: odstupanje od najbližeg idealnog zvona, relativna energija sadržana u prvih pet parcijala, visina udarnog tona, maksimalna vrednost histograma visine udarnog tona dobijenih u kvantitativnim subjektivnim testovima. Na slikama su dati odgovarajući *Spearman*-ovi koeficijenti korelacije. Na osnovu slike 7a, i vrednosti koeficijenta korelacije ispostavlja se da idealan odnos frekvencija prvih pet parcijala nije dovoljan uslov koji će obezbediti zadovoljavajući subjektivan doživljaj zvuka zvona. Na slici 7b uočava se da kriva parametra relativnog udela energije sadržane u prvih pet parcijača prilično dobro prati krivu subjektivne ocene. Na slici 7c prikazani su rezultati kvalitativnih subjektivnih testova i relativne frekvencije petog parcijala analiziranih zvona normalizovane na 1400 Hz. Ako se uzme u obzir teorija prema kojoj visina udarnog tona odgovara tonu koji je za oktavu niži od petog parcijala, može se smatrati da su na slici 7c poređeni rezultati subjektivnih testova sa visinom udarnog tona. Grafik ukazuje na odsustvo jake korelacije subjektivne ocene sa visinom tona zvona, mada su zvona iz nižeg registra blago preferentnija. Pod pretpostavkom da se maksimalna vrednost histograma za veći broj subjekata može povezati sa time koliko je jasno izražen udarni ton, ova vrednost se može uporediti sa rezultatima kvalitativnih subjektivnih testova, kao što je prikazano na slici 7d. Dati su grafici za 10 i za 5 odabranih subjekata. Grafici ne ukazuju na jaku korelaciju izraženosti udarnog tona sa kvalitetom zvona.

VIII. Zaključak

Istraživanje zvona spada u multidisciplinarna istraživanja i obuhvata široku lepezu različitih oblasti. Iako na prvi pogled deluje da je tema veoma stara, dobro istražena i možda ne više tako interesantna, zapravo se sve vreme pojavljuju novi radovi sa temom zvona, stalno dopunjujući istražene karakteristike i dodajući nove informacije, koristeći savremene mogućnosti tehnike i tehnologije, kako za dizajniranje novih oblika, ispitivanje novih materijala pa do novih tehnika za ispitivanje i analizu oscilovanja i proizvođenja zvuka zvona. U ovom istraživanju zvona su obrađena sa više aspekata pri čemu je akcenat stavljen na subjektivni doživljaj zvuka zvona i vezu između objektivnih i subjektivnih karakteristika zvuka zvona. Uspostavljena je metodologija za ispitivanje kvaliteta različitih zvona, čijom primenom je moguće izvršiti ispitivanje uticaja različitih objektivnih parametara u zvuku zvona na subjektivan doživljaj, od kojih su neki prikazani u ovom radu. Realno je pretpostaviti da se metodologija koja je utvrđena u ovom istraživanju može primeniti i za otkrivanje eventualnih pukotina u materijalu zvona koje nastaju tokom eksploatacije, kao i nekih drugih anomalija. Izvedeni zaključci mogu se koristiti kao smernice za dizajn zvona poboljšanih karakteristika uz pomoć prikazanih savremenih tehnika matematičkog modelovanja – metode konačnih elemenata, za koju je i ovom istraživanju potvrđeno da daje dobre predikcije realnih karakteristika.



Sl. 7. Poređenja objektivnih parametara i subjektivnih ocena

ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje svima koji su pomogli da se ovo obimno istraživanje sprovede korektno i do kraja, a pre svega profesorima dr Miomiru Mijiću, dr Ljiljani Milić, dr Dragani Šumarac-Pavlović i dr Jeleni Ćertić, kolegi Dejanu Todoroviću, Igoru Salomu, kao i livnici Ligrap.

REFERENCE

[1] Rossing T.D. edt., Acoustics of Bells, Van Nostrand Reinhold, 1984.
[2] Rossing T.D., "Church Bells and Carillon Bells," in: *Science of Percussion Instruments* (Series in Popular Science Vol. 3), World Scientific Publishing Co. Pte. Ldt., Singapore, 2008, pp. 128-145.
[3] Fletcher N.H., Rossing T.D., *The Physics of Musical Instruments*, second ed., Springer, New York, 1998.
[4] Rossing T.D., Perrin R., Vibrations of Bells, *Applied Acoustics*, Volume 20, Issue 1, pp. 41-70, 1987.
[5] Pavićević-Popović R. „Zvono, s osvrtom na žička zvona", Povelja 37, 02/2007, pp. 153-159, Public Library "Stefan Prvovencani" Kraljevo.
[6] Roozen-Kroon P.J.M., "Structural optimization of bells," PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, 1992.
[7] Lehr A., "The Designing of Swinging Bells and Carillon Bells in the Past and Present," *Athanasius Kircher Foundation*, Asten, Netherlands 1987.
[8] Golas A., Filipek R., "Numerical Simulation for the Bell Directivity Patterns Determination," *Archives of Acoustics*, Vol. 34, No. 4, pp. 415-427, 2009.
[9] Lehr A., "Contemporary Dutch Bell-Founding Art," Hedendaagse Nederlandse Klokkengietkunst. Neth Acoust Soc Publ 1965;7:20–49.
[10] Terhardt E., Seewann M., "Auditive und objektive Bestimmung der Schlagtonhöhe von historischen Kirchenglocken," *Acustica* Vol.54, 1984, pp.129-144. (prevedeno na engleski u [18]).
[11] Wernisch J., "Untersuchungen an Kirchenglocken," Disseration an der Technischen Universität Wien 2004.
[12] Sankiewicz M., Kaczmarek A., Budzyński G., "Acoustic investigation of the carillons in Poland," *Archives of Acoustics*, Vol. 19, No. 3, pp. 333-353, 1994.
[13] Aldoshina I., Nicaranov A., "The Investigation of Acoustical Characteristics of Russian Bells," Proc. 108th Audio Engineering Society Convention, Paris, France, Preprint 5117, February 19-22, 2000.
[14] Aldoshina I., Pychkov. S., Matcievski I., Nicaranov A., Tovstik P., Cherniav S., " The analysis of peculiarities of Russian bells acoustic parameters," Proc. 114th Audio Engineering Society Convention, Amsterdam, Nederlands, , Convention Paper 5794, ;March 22-25, 2003.
[15] Kaminski J., "KOLOKOL: Spectres of the Russian Bell," PhD Thesis, University of Technology, Sydney, 2006.
[16] Гусева А.Н., „Русский колокол как музыкальный феномен," Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора искусствоведения, Российской академии музыки им. Гнесиных на кафедре истории музыки, Москва 2011.
[17] Pan J., "Acoustical properties of ancient Chinese musical bells", Proceedings of Acoustics, Adelaide, Australia 2009.
[18] Hibbert W. A., "The Quantification of Strike Pitch and Pitch Shifts in Church Bells", PhD Thesis, Department of Design, Development, Environment and Materials, Faculty of Mathematics, Computing and Technology, The Open University Milton Keynes, United Kingdom, 2008.
[19] "Probell - Maintenance and Protection of Bells," Sixth Framework Program of the European Community, Co-operative Research Project COOP-CT-2005, http://www.probell.net.
[20] The Bell Project "Research and Identification of Valuable Bells of the Historic and Culture Heritage of Bulgaria and Development of Audio and Video Archive with Advanced Technologies", http://www.math.bas.bg/bells/belleng.html.
[21] Bura N., „Zvona kroz istoriju", Beograd, 2004.
[22] Aleksić N.V., „Druge zove, sebe ne čuje – zvono u srpskoj narodnoj tradiciji", pp. 151-165, *Etnografski institut SANU*, Beograd, 2013.
[23] Rossing T.D., The Science of Sound, second ed., Addison Wesley Publishing Company, 1990.
[24] Benson D., "Music: A Mathematical Offering," December 2008., http://homepages.abdn.ac.uk/mth192/pages/html/music.pdf.
[25] Rossing T.D. edt., *Handbook of acoustics*, Springer, New York, 2007.
[26] Arts J., "The Sound of Bells - Jottings from my experiences in the domain of the sound of bells: secondary strike note," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 10, pp. 327-329, 1939 (štampano u [1]).
[27] Lehr A., "Partial Groups in the Bell Sound," *J.Acoust.Soc.Am.* Vol. 79, No. 6, pp. 2000-2011, June 1986.
[28] Perrin R., Charnley T., "Group theory and the bell," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31 (4), pp. 411-418, 1973.
[29] Lord Rayleigh, *Theory of Sound*, Vol. 1, Macmillan & Co., New York 1877, reprinted by Dover, New York 1945.
[30] Perrin R., Charnley T., DePont J., "Normal Modes of the Modern English Church Bell," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 90, No. 1, pp. 29-49, 1983.
[31] Perrin R., Charnley T., "RIR Modes of the Modern Church Bell," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 119, No. 2, pp. 243-247, 1987.
[32] Sekulović M., *Metoda konačnih elemenata*, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
[33] LIGRAP – livnica zvona porodice Kremenović http://www.ligrap.com.
[34] Salom I., Despot B., Ćertić J, Mijić M., Šumarac Pavlović D., „Subjektivna ocena kvaliteta zvuka zvona," Zbornik 55. konferencije ETRAN, Banja Vrućica - Teslić, Bosna i Hercegovina, 6 - 9.06.2011.
[35] Salom I., Despot B., Mijić M., Šumarac Pavlović D.,"A measure of a bell sound quality," Proceedings of Forum Acusticum 2011, pp. 2561-2564, Aalborg, Denmark, 27 June - 1 July 2011.
[36] Salom I.M., Mijić M.M., Ćertić J.D., Šumarac Pavlović D.S., Despot B.D., "Subjective evaluation and an objective measure of a church bell sound quality," Applied Acoustics, Vol. 85, pp. 97-105, November 2014.
[37] Rayleigh, Lord "On bells," *Phil. Mag*., 29, pp. 1-17, 1890.
[38] Jones, A. T.,"The Strike Note of Bells," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1, pp. 373-381, 1930.
[39] Meyer, E. and J. Klaes, J. "On the Strike note of Bells," *Naturwissenschaften*, 39, pp. 697-701, 1933.
[40] Arts, J. "The Sound of Bells," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 9, pp. 344-347, 1938.
[41] Schouten, J. F. and t'Hart, J. "The Strike Note of Bells," Neth. Acoust Soc. Pub. No. 7, pp. 8-19, 1965.
[42] Pfundner, J. "On the Strike Note of Bells," *Acustica*, 12, pp. 153-157, 1962.
[43] Rossing, T. D. "Acoustics of Percussion Instruments,", *Phys. Teach*., 14, pp. 546-556, 1976.
[44] Schad, C.R. and Frik, G. "On the Strike Note of Bells," *Acustica*, 80, pp. 232-237, 1994.
[45] Terhardt E., "Pitch, consonance, and harmony," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 55, No. 5, 1061–1069, 1974
[46] Terhardt E., "Calculating virtual pitch," *Hearing Research*, Vol. 1, 155-182, 1979.
[47] Terhardt E., Stoll G., Seewann M., "Pitch of complex signals according to virtual pitch theory: Tests, examples, and predictions," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 71, No. 3, pp. 671-678, 1982.
[48] Terhardt E., Stoll G., Seewann M., "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 71, No. 3, pp. 679-688, 1982.
[49] Davis D., Davis C., *Audio Systems* in: *Sound System Engineering*, second edt., Focal Press, 1997.
[50] Brown T.C., Peterson G.L., "An enquiry into the method of paired comparison: reliability, scaling, and Thurstone's Law of Comparative Judgment," Gen Tech. Rep. RMRS-GTR-216WWW, Fort Collins, CO: U.S. Dep. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2009.
[51] Thurstone L.L., "A Law of Comparative Judgment," *Psychological Review* Vol. 34, No.4, pp. 273–286, 1927.
[52] R.A. Bradley, "Paired comparisons: Some basic procedures and examples," in: P.R. Krishnaiah, P.K. Sen (eds.), *Handbook of Statistics*, Vol. 4, pp. 299-326, Elsevier Science Publishers, New York, 1984.

ABSTRACT

The question of how to define a pleasant sounding bell has been posed long ago, since the bell is one of the oldest musical instruments. Recent technological advances provide powerful tools for detailed acoustic analysis of bells. However, subjective aspect of a bell sound as a main indicator of a bell sound quality has been to a certain extent neglected. The main goal of this research was to determine correlation between objective and subjective characteristics of a bell sound.

Analysis of Acoustical Characteristics of a Church Bell Sound

Iva M. Salom